اثر شکل نانوذرات بر یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی نانوسیالی دارای متمرکزکنندهٔ سهموی خطی*

فریده یزدانی فرد[۱]   احسان ابراهیم‌نیا بجستان[۲]   مهران عامری[۳]

چکیده در این پژوهش، یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی- خطی شبیه‌سازی شده و اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم/ اتیلن‌گلیکول: آب ۵۰:۵۰ دارای نانوذرات مختلف پلاکتی، استوانه‌ای، تیغه‌ای و آجری‌شکل بر کارایی این سیستم از دیدگاه انرژی و اگزرژی در دو جریان آرام و مغشوش بررسی شده است. مدل پیشنهادشده بااستفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شده است و تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده گردیده است. باتوجه به نتایج، استفاده از نانوسیال با نانوذرات استوانه‌ای‌شکل در جریان آرام و نانوذرات آجری‌شکل در جریان مغشوش منجر به حداکثر بازده سیستم می‌گردد. به علاوه، استفاده از نانوسیال در جریان آرام نسبت به جریان مغشوش برای بهبود عملکرد سیستم فتوولتاییک/ حرارتی مؤثرتر است.

واژه‌های کلیدی سیستم فتوولتاییک/ حرارتی، شکل نانوذرات، نانوسیال، جریان آرام، جریان مغشوش.

Nanoparticle Shape Effect on a Nanofluid-Based Parabolic Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal System

F. Yazdanifard   E. Ebrahimnia-Bajestan   M. Ameri

Abstract *In this study, a linear parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system has been simulated and the effects of using Al_2O_3/ethylene glycol-water 50:50 nanofluid with different nanoparticle shapes including platelet, cylindrical, blade and brick shapes from energy and exergy standpoints in the laminar and turbulent regimes have been numerically investigated. The proposed model has been validated using existing experimental results where good agreement was observed. The results indicated that using nanoparticles of cylindrical shape in laminar regime and brick-shaped one in turbulent regime lead to the best system performance compared to others. In addition, applying nanofluid in laminar regime is more effective compared to turbulent regime.*

Key Words Photovoltaic/Thermal system, Nanoparticles shape, Nanofluid, Laminar flow, Turbulent flow

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/٤/۱۸ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v29i2.62148

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، e.ebrahimnia@qiet.ac.ir

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

مقدمه

سوخت‌های فسیلی منبع تولید ۹۹٪ انرژی در ایران هستند و کمتر از ۱٪ انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود [1]. از طرف دیگر، منابع نفت و گاز جهان محدود است و عمر این منابع نیز کوتاه پیش‌بینی شده است [2]. همچنین، بحث آلایندگی سوخت‌های فسیلی که به یکی از بحران‌های جدی کلان‌شهرهای ایران تبدیل شده است، نشان‌دهندهٔ اهمیت استفاده از روش‌های جایگزین تولید انرژی، ازجمله منابع تولید انرژی تجدیدپذیر است. در ایران انرژی خورشیدی بیشترین پتانسیل را برای تولید انرژی بین سایر انرژی‌های تجدیدپذیر دارد و میزان تابش دریافتی در ایران عالی تخمین زده شده است [1]. بنابراین، استفاده از سیستم‌های خورشیدی مانند سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی می‌تواند بخشی از نیاز انرژی را به‌ویژه در بخش خانگی پاسخ‌گو باشد.

سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی برحسب ساختار یا عملکرد به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند [3]. یکی از این انواع، سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی در ترکیب با متمرکزکننده‌های تابش خورشیدی هستند که به‌دلیل تمرکز تابش قادر به تولید میزان بیشتر الکتریسیته نسبت به سطح فتوولتاییک و تولید انرژی حرارتی با کیفیت بالاتر می‌باشند [4]. در این راستا، استفاده از عدسی‌های فرنل، متمرکزکننده‌های سهموی، سهموی ترکیبی و هذلولوی برای تمرکز تابش در سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [5]. در این بین متمرکزکننده‌های سهموی شناخته‌شده‌ترین متمرکزکننده‌ها به‌سبب نصب نسبتاً آسان و قیمت پایین هستند. در این متمرکزکننده‌ها یک آینهٔ سهموی‌شکل نور خورشید را برروی دریافت‌کنندهٔ واقع در نقطهٔ کانونی یا خط کانونی متمرکز می‌کند.

تحقیقات متعددی درزمینهٔ سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی صورت گرفته است. کاونتری [6] در سال ۲۰۰۵ به‌صورت آزمایشگاهی یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی را با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی و نسبت تمرکز ۳۷ مورد بررسی قرار داد. بازده حرارتی و الکتریکی این سیستم به‌ترتیب ۵۸ و ۱۱ درصد به‌دست آمد. لی و همکارانش [7, 8] در سال ۲۰۱۱ عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی را با چند نوع متمرکزکنندهٔ سهموی خطی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. طبق نتایج آنها سلول‌های فتوولتاییک سیلیکونی برای نسبت‌های تمرکز کم و متوسط و سلول‌های گالیوم آرسنید برای نسبت‌های تمرکز زیاد عملکرد مناسبی دارند. جی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۲ یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی سهموی خطی را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. طبق بررسی آنها عملکرد سیستم با افزایش ضریب انعکاس متمرکزکننده افزایش می‌یابد. کالیسه و همکاران [10] در سال ۲۰۱۲ یک مدل حجم محدود را برای سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی و دریافت‌کنندهٔ سه‌وجهی با دو وجه شامل سلول‌های فتوولتاییک تک‌کریستالی و یک وجه شامل جاذب حرارتی که لوله سیال خنک‌کننده داخل این سه‌وجهی جریان دارد ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که انتخاب دبی جرمی مناسب برای عملکرد مناسب سیستم بسیار مهم است. چابان و همکاران [11] در سال ۲۰۱۳ یک سیستم فتولتاییک و یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی را در شرایط آب و هوایی خاص به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که سیستم فتوولتاییک/ حرارتی بازده الکتریکی بیشتری نسبت به سیستم فتولتاییک تنها دارد. دل کول و همکاران [12] در سال ۲۰۱۴ عملکرد الکتریکی یک سیستم فتوولتاییک/

حرارتی سهموی خطی با نسبت تمرکز ۱۳۰ را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند. طبق بررسی آنها افزایش دمای عملکرد سیستم تأثیر کمی بر بازده الکتریکی دارد و می‌توان برای دستیابی به حرارت خروجی با دمای مناسب، دمای کارکرد سیستم را افزایش داد.

یکی از روش‌های افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی خورشیدی استفاده از نانوسیالات است که توجه محققان بسیاری را به خود معطوف داشته است [13]. نانوسیال حاصل تعلیق ذرات با اندازهٔ نانو (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در سیالات متداول است، که خصوصیات انتقال حرارتی بهتری نسبت سیال پایه را از خود بروز می‌دهد. با این وجود، تحقیقات کمی درزمینهٔ استفاده از نانوسیالات در سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی انجام شده است. ماهیان و همکاران [14] در سال ۲۰۱۳ میزان تولید انتروپی در جریان نانوسیال با هندسه‌های مختلف را به‌صورت عددی بررسی کردند. طبق بررسی آنها با انتخاب رژیم جریان، اندازهٔ کانال و کسر حجمی مناسب می‌توان میزان تولید انتروپی را کاهش داد. کوی و زو [15] در سال ۲۰۱۲ استفاده از جریان نانوسیال اکسید منیزیم/ آب را برروی پانل‌های فتوولتاییک سیلیکونی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که راندمان الکتریکی سیستم فتوولتاییک/ حرارتی کمتر از ماژول فتوولتاییک است، اما راندمان انرژی کلی آن بالاتر است. سردارآبادی و همکاران [16] در سال ۲۰۱٤ تأثیر استفاده از نانوسیال اکسید سیلیسیم/ آب را به‌عنوان سیال خنک‌کننده بر بازده الکتریکی و حرارتی یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها نشان دادند که بااستفاده از نانوسیال و افزایش کسر حجمی ذرات، بازده انرژی و اگزرژی درمقایسه با سیستم فتوولتاییک بدون گرداورندهٔ حرارتی افزایش می‌یابد. کرمی و رحیمی [17] در سال ۲۰۱٤ یک سیستم ترکیبی شامل سیستم خنک‌کنندهٔ میکروکانال، سیستم فتوولتاییک/ حرارتی و نانوسیال بوهمیت/ آب را طراحی کردند. براساس نتایج آنها با کاهش کسر حجمی نانوذرات دمای متوسط سطح فتوولتاییک کاهش و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد. سردار آبادی و همکاران [18] در سال ۲۰۱٦ به‌صورت عددی و آزمایشگاهی استفاده از نانوسیال اکسید تیتانیوم/ آب، اکسید آلومینیوم/ آب و اکسید روی/ آب را در سیستم فتوولتاییک/ حرارتی صفحه و لوله بررسی کردند. طبق نتایج آنها بیشترین بازده الکتریکی مربوط به نانوسیال اکسید تیتانیوم/ آب بود. رجب و همکاران [19] در سال ۲۰۱٦ استفاده از نانوسیال با دوسیال پایهٔ آب و اتیلن گلیکول را در سیستم فتوولتاییک/ حرارتی صفحه و لوله بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که نانوسیال با سیال پایهٔ آب کارامدتر است.

مطالعات اندکی نیز درزمینهٔ استفاده از نانوسیالات به‌عنوان سیال خنک‌کننده در سیستم‌های فتوولتاییک/ حرارتی داری متمرکزکننده وجود دارد. زو و کلینستریور [20] در سال ۲۰۱٤ با مدل‌سازی دوبعدی و استفاده از یک مدل جدید برای هدایت حرارتی نانوسیالات، تأثیر استفاده از نانوسیالات را بر بهبود بازده سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکننده مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که استفاده از نانوسیال بازده الکتریکی و کلی سیستم را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که بر بازده حرارتی تأثیر اندکی دارد. زو و کلینستریور در مقالهٔ دیگری [21] در سال ۲۰۱٤ تأثیر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب را بر خنک‌کنندگی یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی و نسبت تمرکز بالا به‌صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوسیال و کاهش دمای ورودی آن منجر به بهبود عملکرد سلول‌های فتوولتاییک

مـی‌شـود. جینـگ و همکـاران [22] در سـال ۲۰۱۵ به‌صورت آزمایشـگاهی نانوسـیال سـیلیکا/ آب را طـی فرایندی تک‌مرحلـه‌ای سـاختند و اسـتفاده از آن را در سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ پیشـنهادی خود به‌صورت عددی مورد مطالعـه قـرار دادنـد. آنهـا سعی کردند که دبی جرمـی و نسـبت تمرکـز بهینـه را برای دستیابی بـه بهتـرین عملکـرد سیسـتم از دیـدگاه اگزرژی به‌دست آورند. ردوان و همکاران [23] در سال ۲۰۱٦ به‌صـورت عـددی اسـتفاده از نانوسـیال اکسـید آلومینیـوم/ آب و کاربیـد سیلیسـیم/ آب را در سیسـتم فتوولتاییک/ حرارتـی بـا متمرکزکننـده مطالعـه کردنـد. نتـایج ایشـان نشـان داد کـه اسـتفاده از نانوسـیال در نسبت‌های تمرکز زیاد و اعداد رینولـدز کـم منجـر بـه بیشترین بازده الکتریکی می‌شود. بـه‌عـلاوه، اسـتفاده از کاربید سیلیسیم/ آب دمای فتوولتاییک را درمقایسـه بـا اکسید آلومینیوم/ آب کاهش بیشتری می‌دهد.

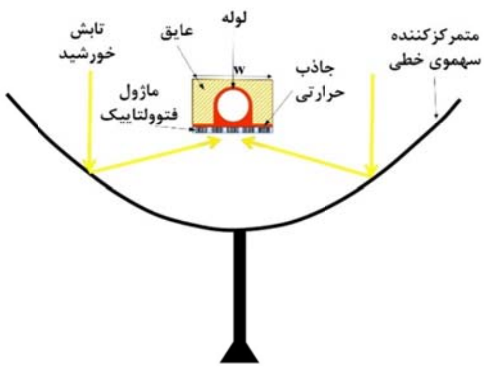
در بین کارهایی که تاکنون صـورت گرفتـه اسـت عملکرد سیستم فتوولتاییک/ حرارتـی بـا متمرکزکننـدهٔ سهموی خطی تحت دو جریان آرام و مغشوش ارزیابی نشـده اسـت. همچنـین تـأثیر اسـتفاده از نانوسـیال بـا شکل‌های مختلـف نـانوذره در ایـن سیسـتم‌هـا مـورد مطالعه قرار نگرفته است. هدف پژوهش حاضر بررسی و مقایسهٔ تـأثیر اسـتفاده از نانوسـیال بـا چهـار شـکل نـانوذره پلاکتـی، اسـتوانه‌ای، تیغـه‌ای و آجـری‌شـکل به‌عنوان سیال عامل بر عملکرد ایـن سیسـتم از دیـدگاه قـانون اول و دوم ترمودینامیـک در دو جریـان آرام و مغشوش است.

مدل‌سازی

سیستم فتوولتاییـک/حرارتی بـا متمرکزکننـدهٔ سـهموی خطی که در شکل (۱) نشان داده شده، برای ارائهٔ یـک مدل ریاضی مـورد بررسـی قـرار گرفتـه اسـت. بـرای نوشتن معادلات موازنهٔ انرژی برای اجزای مختلف این سیستم، المان دیفرانسیلی به‌طول dx و عرض w درنظر گرفته می‌شود. فرضـیات مـورد اسـتفاده بـرای نوشـتن معـادلات انـرژی عبارتنـد از انتقـال حـرارت پایـا و یک‌بعدی، ثابت درنظر گرفتن خواص ترموفیزیکی همهٔ اجزای سیستم فتوولتاییـک/ حرارتـی، چشـم‌پوشـی از ظرفیت گرمایی ویژهٔ همهٔ اجزا بـه‌جـز نانوسـیال درون لوله‌ها به‌دلیل ناچیز بودن آن درمقابل ظرفیـت گرمـایی نانوسیال. با این فرضیات معادلات انرژی برای هر یـک از اجزا در جدول (۱) ارائه شده است.

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار متلب و برای حل معادلات موازنهٔ انرژی از روش رانگ کوتا مرتبهٔ چهار استفاده شده است. روابط استفاده‌شده برای خواص نانوسیالات در جـدول (۲) ارائـه شـده اسـت. سیال پایهٔ مورد استفاده، مخلوط آب: اتیلن گلیکـول بـا نسبت ۵۰:۵۰ است که دارای نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌باشد.

شکل (۲) بیـانگر شـکل‌هـای مختلـف نـانوذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده در مطالعهٔ حاضـر اسـت. ثوابت A_1 و A_2 در رابطـهٔ ویسـکوزیته و ثابـت C_k در رابطـهٔ رسـانایی حرارتـی بـرای شـکل‌هـای مختلـف نانوذرات اکسید آلومینیـوم در جـدول (۳) ارائـه شـده است.



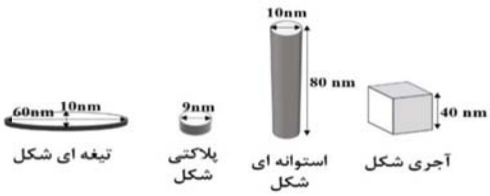
شکل ۱ سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی

جدول ۱ معادلات موازنهٔ انرژی اجزای سیستم فتوولتاییک/ حرارتی [24]

جزء	معادلهٔ انرژی
پانل فتوولتاییک	$I_B CR\rho_{con}\gamma_t\alpha_{pv}\left[1-pa\times\eta_r\left(1-\beta_r\left(T_{pv}-T_r\right)\right)\right]wdx = \left(h_{r,pv-a}+h_{c,pv-s}\right)\left(T_{pv}-T_a\right)wdx + h_{pv-abs}\left(T_{pv}-T_{abs}\right)wdx + h_{pv-t}\left(T_{pv}-T_t\right)wdx$
جاذب حرارتی	$h_{pv-abs}\left(T_{pv}-T_{abs}\right)wdx = h_{abs-t}(T_{abs}-T_t)wdx + h_{abs-i}(T_{abs}-T_i)\,wdx$
لوله	$h_{abs-t}(T_{abs}-T_t)wdx + h_{pv-t}\left(T_{pv}-T_t\right)wdx = h_{t-w}(T_t-T_w)wdx + h_{t-i}(T_t-T_i)wdx$
لایهٔ عایق	$h_{abs-i}(T_{abs}-T_i)wdx + h_{t-i}(T_t-T_i)wdx = h_{i-a}(T_i-T_a)wdx$
سیال خنک‌کن	$h_{t-w}(T_t-T_w)wdx = \dot{m}C_p dT_w$

جدول ۲ روابط استفاده‌شده برای خواص نانوسیالات

خاصیت	مرجع	رابطه
چگالی	[25]	$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}$
ظرفیت گرمایی	[26]	$C_{p,nf} = \dfrac{(1-\varphi)\left(\rho C_p\right)_{bf} + \varphi\left(\rho C_p\right)_{np}}{\rho_{nf}}$
ویسکوزیته	[27]	$\dfrac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + A_1\varphi + A_2\varphi^2$
رسانایی حرارتی	[28]	$\dfrac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + C_k\varphi$



شکل ۲ اشکال مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم [27]

جدول ۳ ثابت‌های A_1 و A_2 در رابطهٔ ویسکوزیته و ثابت C_k در رابطهٔ رسانایی حرارتی برای شکل مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم [27, 28]

نوع نانوذره	C_k	A_1	A_2
پلاکتی	۲/۶۱	۳۷/۱	۶۱۲/۶
تیغه‌ای	۲/۷۴	۱۴/۶	۱۲۳/۳
استوانه‌ای	۳/۹۵	۱۳/۵	۹۰۴/۴
آجری	۳/۳۷	۱/۹	۴۷۱/۴

باتوجه به طول لوله، جریان داخل لوله در حالت آرام ازنظر هیدرودینامیکی توسعه یافته و ازنظر حرارتی در حال توسعه، اما در حالت جریان مغشوش از نظر هیدرودینامیکی و حرارتی توسعه یافته است. عدد ناسلت برای جریان آرام داخل لوله در حالت توسعه‌یافتهٔ حرارتی به‌شکل زیر محاسبه می‌شود [29]:

$$x^* = \frac{L}{RePrD} \quad (۱)$$

$$Nu_w = \begin{cases} 1.953(x^*)^{-1/3} & x^* \le 0.03 \\ 4.364 + \dfrac{0.0722}{x^*} & x^* > 0.03 \end{cases} \quad (۲)$$

برای جریان مغشوش عدد ناسلت از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد [30]:

$$Nu_w = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (۳)$$

چاره‌ای جز استفاده از روابط (۲ و ۳) بـرای عـدد ناسلت نیست، چون داده‌های مناسب یا رابطه‌ای بـرای عدد ناسلت تابع شکل نانوذرات وجود ندارد.

روابط مربوط به بازده انرژی و اگزرژی در جدول (٤) ارائه شده است. توان خروجی پانـل فتوولتاییـک و توان پمپ در روابط بازده انرژی و اگـزرژی الکتریکـی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}_{PV} = I_B C R \rho_{con} \gamma_t \alpha_{pv} A_{PV/T}\, pa \times \eta_r\left[1 - \beta_r\left(T_{pv} - T_r\right)\right] \quad (٤)$$

$$P_{pump} = \frac{\dot{m} \times \rho g (L\sin\theta + h_l)}{\rho \times \eta_{pump}} \quad (۵)$$

اعتبارسنجی

اعتبار سنجی حـل عـددی، بااسـتفاده از نتـایج تجربـی موجود [9] برای یک سیستم با مساحت دهانهٔ مؤثر آینهٔ سـهموی خطـی $۱/۹۵m^2$، نسـبت تمرکـز ۱٦/۹۲، دریافت‌کننـده بـه‌ابعـاد ۱/۵m×۰/۱۲m×۰/۰۹m و قطـر لوله ۰/۰۳m انجام شده است. باتوجـه بـه جـدول (۵)، تطابق بسیار مناسبی بین نتایج حاصل از مدل پیشنهادی پژوهش حاضر با دمای تجربی گزارش‌شده توسط جی و همکاران [9] وجود دارد.

نتایج و بحث

پس از اطمینان از صحت مدل، نتایج مدل‌سازی باتوجه به اطلاعات موجود در جـدول (٦) ارائـه شـده اسـت. برای بررسی اثر هر یک از پارامترها، پارامتر مورد نظـر تغییر داده شده و بقیه پارامترهـا مطـابق بـا جـدول (٦) ثابت درنظر گرفته شده‌اند.

شکل (۳) تغییرات دمای فتوولتاییک و شـکل (٤) تغییرات دمای خروجی نانوسیال اکسید آلومینیوم/ اتیلن گلیکـول: آب ۵۰:۵۰ را بـرای چهـار شـکل نـانوذرهٔ پلاکتی، استوانه‌ای، تیغه‌ای و آجری‌شـکل در کسـرهای حجمی مختلف، برای دو جریان آرام و مغشوش نشـان می‌دهند.

جدول ٤ روابط بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی

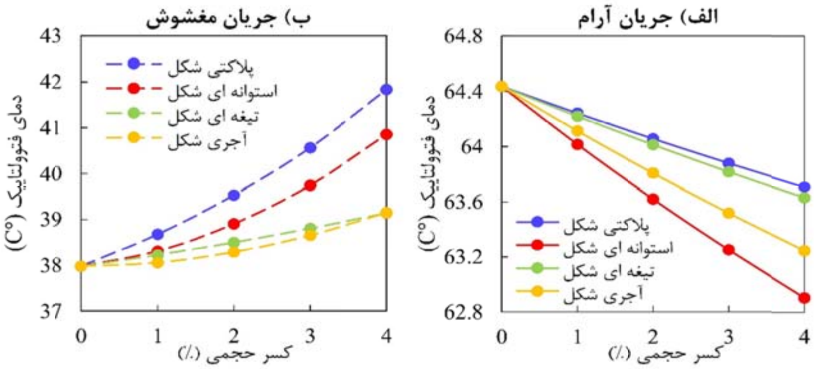
بازده	انرژی	اگزرژی
حرارتی	$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{w,out} - T_{w,in})}{I_B A_{ca}}$	$\dot{\varepsilon}_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{w,out} - T_{w,in})\left(1 - \frac{293}{293 + (T_{w,out} - T_a)}\right)}{\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}}\right] I_B A_{ca}}$
الکتریکی	$\eta_{ele} = \frac{\dot{E}_{PV} - P_{pump}}{I_B A_{ca}}$	$\dot{\varepsilon}_{ele} = \frac{\dot{E}_{PV} - P_{pump}}{\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}}\right] I_B A_{ca}}$
کلی	$\eta_{CPV/T} = \eta_{th} + \eta_{ele}$	$\dot{\varepsilon}_{PV/T} = \dot{\varepsilon}_{th} + \dot{\varepsilon}_{ele}$

جدول ۵ نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل

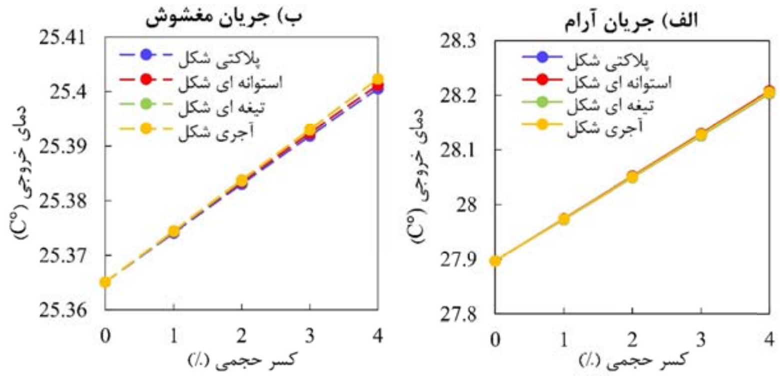
نوع سلول فتوولتاییک	تابش مستقیم $(W.m^{-2})$	دمای آب ورودی (°C)	دبی جرمی $(kg.s^{-1})$	دمای آب خروجی			دمای فتوولتاییک		
				تجربی جی و همکاران[9]	پژوهش حاضر	خطا (٪)	تجربی جی و همکاران[9]	پژوهش حاضر	خطا (٪)
سوپر	۹۰۵/۱	۲۲/٦	۰/۰۰۵	۵۰/۱	۵۰/۹	۱/٦	۸۳/۲	۸۱/۷	−۱/۸
	۹۵۳/۷	۲٤/۱	۰/۰۱۱۱	۳۹/۰	۳۷/۲	−٤/٦	۵۷/٦	٦۲/۷	۸/۸
گالیم آرسناید	۹۰۲/۱	۲۰/۱	۰/۰۰۸	۳۹/۱	۳۸/۳	−۲	٦۱/٤	٦۲/۹	۲/٤
	۸۹٤/۲	۱۹/۸	۰/۰۰۸	۳۸/۲	۳۷/٤	−۲/۱	۵۹/٤	٦۱/۲	۳

جدول ٦ پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی

جزء	پارامتر
متمرکزکنندهٔ سهموی	نسبت تمرکز: ۱۵، ضریب انعکاس: ۰/۸، ضریب ممانعت: ۰/۹۵
صفحهٔ فتوولتاییک	ضریب جذب: ۰/۹، ضریب انتشار: ۰/۹، ضریب هدایت حرارتی: ۱۰۰$Wm^{-1}K^{-1}$، بازده سلول مرجع: ۱۵٪، ضریب دمایی مرجع: ۰/۰۰٤٥K^{-1}، دمای مرجع: ۲۹۸K
صفحهٔ جاذب (مسی)	ضخامت: ۰/۰۰۳m، ضریب هدایت حرارتی: ۳۱۰$Wm^{-1}K^{-1}$
لوله (مسی)	قطر داخلی: ۰/۰۳m، ضخامت: ۰/۰۰۳m، طول: ۲m، ضریب هدایت حرارتی: ۳۱۰$Wm^{-1}K^{-1}$
لایهٔ عایق	ضخامت: ۰/۰٥m، ضریب هدایت حرارتی: ۰/۰۳$Wm^{-1}K^{-1}$
سیال درون لوله	دمای ورودی: ۲۹۸K، دبی جرمی در جریان آرام: ۰/۱۲kgs^{-1}، دبی جرمی در جریان مغشوش: ۱kgs^{-1}
سایر پارامترها	سرعت باد: ۱/٥ms^{-1}، دمای محیط: ۲۹۸K، تابش مستقیم: ۷۰۰Wm^{-2}، شیب کلکتور: ۳۰°، ضریب فشردگی: ۰/۹، بازده پمپ: ۰/۸



شکل ۳ تغییرات دمای فتوولتاییک با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش



شکل ٤ تغییرات دمای خروجی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است، در جریان آرام با افزایش کسر حجمی نانوذرات دمای فتوولتاییک کاهش می‌یابد، اما شاهد روندی متفاوت در جریان مغشوش هستیم. برای توضیح این رفتار،

جـدول‌هـای (۷ و ۸) ارائـه شـده‌انـد کـه تغییـرات ویژگی‌های نانوسیال را در کسـرهای حجمـی مختلـف به‌ترتیب برای جریان آرام و مغشوش نشان می‌دهند.

باتوجه به جدول‌هـای (۷ و ۸)، بـا افـزایش کسـر حجمی، ویسکوزیته و رسانایی حرارتی افـزایش، ولـی ظرفیت حرارتی کاهش پیدا می‌کنـد. عـدد رینولـدز بـا ویسکوزیته رابطـهٔ عکـس دارد. از طـرف دیگـر، عـدد پرانتـل بـا ویسـکوزیته نسـبت مسـتقیم و بـا رسـانایی حرارتی نسبت عکس دارد. ازآن‌جایی کـه در نانوسـیال مورد بررسی در این پژوهش میزان افزایش ویسکوزیته با کسر حجمی بیش از رسانایی حرارتـی اسـت، عـدد پرانتل با افزایش کسر حجمی افزایش پیدا می‌کند. عدد ناسلت متناسب با عدد رینولـدز و عـدد پرانتـل اسـت. درنتیجه با کاهش بیشتر عدد رینولدز درمقابـل افـزایش عدد پرانتل، عدد ناسلت در هر دو جریان کـاهش پیـدا می‌کند. این کاهش در جریان آرام بسیار کمتر از جریان مغشوش است؛ از سوی دیگر ضـریب انتقـال حـرارت متناسب با عدد ناسلت و رسـانایی حرارتـی اسـت. در جریان آرام، که میـزان کـاهش عـدد ناسـلت بـا کسـر حجمی اندک است، افزایش رسانایی حرارتی منجر بـه افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. درحـالی‌کـه در جریان مغشوش کاهش شدید در عدد ناسلت بـا کسـر حجمی، باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌گـردد. درنهایت، افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان آرام باعث کاهش دمای فتوولتاییک و کاهش ضریب انتقـال حـرارت در جریـان مغشـوش باعـث افـزایش دمـای فتوولتاییک می‌شود.

در بین شکل‌های مختلف، نوع پلاکتی، استوانه‌ای، تیغه‌ای و آجری به‌ترتیب بیشـترین ویسـکوزیته و نـوع استوانه‌ای، آجری، تیغه‌ای و پلاکتی به‌ترتیـب بیشـترین رسـانایی حرارتـی را دارا مـی‌باشـند. تـأثیر تغییـرات ویسکوزیته و رسـانایی حرارتـی بـر اعـداد رینولـدز و پرانتل و درنتیجه بر ضریب انتقال حـرارت بـه‌گونـه‌ای است که نـانوذرهٔ اسـتوانه‌ای بیشـترین ضـریب انتقـال حرارت را در جریان آرام دارد و پـس از آن بـه‌ترتیـب نـانوذرات آجـری، تیغـه‌ای و پلاکتـی قـرار دارنـد. در جریان مغشوش، بهترین ضریب انتقال حرارت به‌ترتیب مربوط به نانوذرات آجری، تیغه‌ای، استوانه‌ای و پلاکتی شکل است. درنتیجه باتوجه بـه شـکل (۳)، در جریـان آرام نـانوذرهٔ اسـتوانه‌ای‌شـکل و در جریـان مغشـوش نانوذرهٔ آجری‌شکل کمترین دمای فتوولتاییک را نتیجـه می‌دهند. همان‌طـور کـه از شـکل (٤) مشـخص اسـت دمای خروجی سیال در هر دو جریان آرام و مغشـوش افزایش پیدا می‌کند. علت ایـن پدیـده کـاهش ظرفیـت حرارتی نانوسیال با افزایـش کسـر حجمـی اسـت. در جریان آرام، شکل‌های مختلف نـانوذرات دارای دمـای خروجی تقریباً یکسـانی هسـتند. در جریـان مغشـوش نانوذرات تیغه‌ای و آجری‌شکل به‌دلیـل ضـریب انتقـال حرارت بالاتر، اندکی دمای خروجی بیشتری درمقایسه با نانوذرات استوانه‌ای و پلاکتی‌شکل دارند.

جدول ۷ تغییرات ویژگی‌های نانوسیال با شکل و کسرهای حجمی مختلف نانوذرات در جریان آرام

شکل نانوذرات	کسر حجمی	$\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}$	$\frac{c_{p,nf}}{c_{p,bf}}$	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}$	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}}$	عدد رینولدز	عدد پرانتل	عدد ناسلت	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-2}K^{-1}$)
پلاکتی	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۵۷۰/۷٦۷	۲۸/۹۰٤	۱۷/۱۸۳	۲۱۲/۳۸۵
	٪۱	۱/۰۲٤	۰/۹۷۵	۱/٤۳۲	۱/۰۲٦	۱۰۹۷/۹۷٤	۳۹/۲۸۰	۱٦/۸۹۱	۲۱٤/۲٤۳
	٪۲	۱/۰٤۷	۰/۹۵۰	۱/۹۸۷	۱/۰۵۲	۷۹۲/۳٤۱	۵۱/۷٦۷	۱٦/٦۱۱	۲۱٦/۰٦۲
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۲/٦٦٤	۱/۰۷۸	۵۹۱/٦۱۱	٦٦/۰۱۱	۱٦/۳٤۱	۲۱۷/۸٤۳
	٪٤	۱/۰۹٤	۰/۹۰۵	۳/٤٦٤	۱/۱۰٤	٤۵۵/۵۵۲	۸۱/۷۰۹	۱٦/۰۸۱	۲۱۹/۵۸۹
استوانه‌ای	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۵۷۰/۷٦۷	۲۸/۹۰٤	۱۷/۱۸۳	۲۱۲/۳۸۵
	٪۱	۱/۰۲٤	۰/۹۷۵	۱/۲۲۵	۱/۰۳۹	۱۲۸۳/۳۱٦	۳۳/۱۷۳	۱٦/۸۱۸	۲۱٦/۱۰۵

	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۰	۱/۶۳۱	۱/۰۷۹	۹۶۴/۹۰۷	۴۱/۴۵۳	۱۶/۴۷۲	۲۱۹/۷۱۶
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۲/۲۱۹	۱/۱۱۸	۷۱۰/۴۱۳	۵۲/۹۹۶	۱۶/۱۴۳	۲۲۳/۲۲۵
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۵	۲/۹۸۷	۱/۱۵۸	۵۲۸/۳۷۳	۶۷/۱۸۷	۱۵/۸۳۰	۲۲۶/۶۳۸
تیغه‌ای	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۵۷۰/۷۶۷	۲۸/۹۰۴	۱۷/۱۸۳	۲۱۲/۳۸۵
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۱۵۸	۱/۰۲۷	۱۳۵۷/۶۳۵	۳۱/۷۲۷	۱۶/۸۸۴	۲۱۴/۴۲۴
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۰	۱/۳۴۱	۱/۰۵۵	۱۱۷۳/۷۸۵	۳۴/۸۵۸	۱۶/۵۹۷	۲۱۶/۴۱۸
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۲/۵۴۹	۱/۰۸۲	۱۰۱۷/۶۲۲	۳۸/۲۳۸	۱۶/۳۲۱	۲۱۸/۳۶۸
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۵	۲/۷۸۱	۱/۱۱۰	۸۸۵/۹۴۹	۴۱/۸۱۸	۱۶/۰۵۷	۲۲۰/۲۷۸
آجری	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۵۷۰/۷۶۷	۲۸/۹۰۴	۱۷/۱۸۳	۲۱۲/۳۸۵
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۰۶۶	۱/۰۳۴	۱۴۷۵/۰۹۰	۲۹/۰۲۳	۱۶/۸۴۹	۲۱۵/۳۰۰
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۰	۱/۲۲۶	۱/۰۶۷	۱۲۸۳/۷۶۵	۳۱/۴۹۶	۱۶/۵۳۱	۲۱۸/۱۳۸
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۱/۴۸۱	۱/۱۰۱	۱۰۶۴/۳۷۲	۳۵/۹۳۱	۱۶/۲۲۸	۲۲۰/۹۰۴
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۵	۱/۸۳۰	۱/۱۳۵	۸۶۲/۵۱۷۹	۴۲/۰۰۰	۱۵/۹۳۷	۲۲۳/۶۰۱

جدول ۸ تغییرات ویژگی‌های نانوسیال با شکل و کسرهای حجمی مختلف نانوذرات در جریان مغشوش

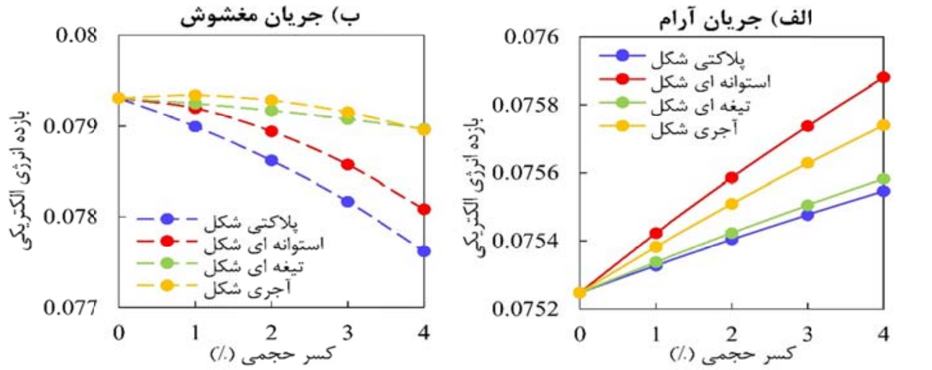
شکل نانوذرات	کسر حجمی	$\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}$	$\frac{c_{p,nf}}{c_{p,bf}}$	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}$	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}}$	عدد رینولدز	عدد پرانتل	عدد ناسلت	ضریب انتقال حرارت $(Wm^{-2}K^{-1})$
پلاکتی	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۲۶۰۲/۳۹	۳۰/۰۳۹	۱۶۷/۴۲۵	۲۰۶۵/۱۳۷
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۴۳۲	۱/۰۲۶	۸۸۰۰/۰۱	۴۰/۸۶۷	۱۳۲/۵۲۶	۱۶۷۷/۳۴۴
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۱	۱/۹۸۷	۱/۰۵۲	۶۳۴۳/۸۱۷	۵۳/۹۱۷	۱۰۵/۲۱۸	۱۳۶۵/۵۹۷
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۲/۶۶۴	۱/۰۷۸	۴۷۳۱/۷۲۷	۶۸/۸۲۸	۸۳/۷۷۳	۱۱۱۴/۲۴۴
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۶	۳/۴۶۴	۱/۱۰۴	۳۶۳۹/۶۷۶	۸۵/۲۸۹	۶۶/۵۹۸	۹۰۷/۲۵۱
استوانه‌ای	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۲۶۰۲/۳۹	۳۰/۰۳۹	۱۶۷/۴۲۵	۲۰۶۵/۱۳۷
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۲۲۵	۱/۰۳۹	۱۰۲۸۵/۳۳	۳۴/۵۱۴	۱۴۵/۱۷۵	۱۸۶۱/۴۳۵
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۱	۱/۶۳۲	۱/۰۷۹	۷۷۲۵/۱۷۸	۴۳/۱۷۶	۱۱۸/۸۸۱	۱۵۸۲/۲۳۱
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۲/۲۱۹	۱/۱۱۸	۵۶۸۱/۵۶۷	۵۵/۲۶۱	۹۴/۶۴۲	۱۳۰۵/۷۴
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۶	۲/۹۸۷	۱/۱۵۸	۴۲۲۱/۱۲۴	۷۰/۱۳۷	۷۴/۱۸۴	۱۰۵۹/۶۵
تیغه‌ای	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۲۶۰۲/۳۹	۳۰/۰۳۹	۱۶۷/۴۲۵	۲۰۶۵/۱۳۷
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۱۵۸	۱/۰۲۷	۱۰۸۸۱/۱۷	۳۳/۰۰۸	۱۵۰/۷۷۳	۱۹۱۰/۷۱۵
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۱	۱/۳۴۱	۱/۰۵۵	۹۳۹۸/۰۵۹	۳۶/۳۰۵	۱۳۵/۵۳۷	۱۷۶۳/۴۵۷
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۱/۵۴۹	۱/۰۸۲	۸۱۳۹/۱۸۶	۳۹/۸۶۸	۱۲۱/۷۶۱	۱۶۲۵/۳۷۷
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۶	۱/۷۸۱	۱/۱۱۰	۷۰۷۸/۷۳۹	۴۳/۶۴۷	۱۰۹/۳۷۸	۱۴۹۷/۰۶۶
آجری	٪۰	۱	۱	۱	۱	۱۲۶۰۲/۳۹	۳۰/۰۳۹	۱۶۷/۴۲۵	۲۰۶۵/۱۳۷
	٪۱	۱/۰۲۴	۰/۹۷۵	۱/۰۶۶	۱/۰۳۳	۱۱۸۲۲/۵۹۰	۳۰/۱۹۵	۱۵۸/۰۰۴	۲۰۱۴/۶۳۲
	٪۲	۱/۰۴۷	۰/۹۵۱	۱/۲۲۶	۱/۰۶۷	۱۰۲۷۸/۴۵۰	۳۲/۸۰۳	۱۴۲/۵۲۶	۱۸۷۶/۵۴۴
	٪۳	۱/۰۷۱	۰/۹۲۸	۱/۴۸۱	۱/۱۰۱	۸۵۱۲/۹۳۶	۳۷/۴۶۴	۱۲۴/۵۱۳	۱۶۹۱/۱۴۶
	٪۴	۱/۰۹۴	۰/۹۰۶	۱/۸۳۰	۱/۱۳۵	۶۸۹۱/۱۸۳	۴۳/۸۴۰	۱۰۶/۶۲۵	۱۴۹۲/۵۲۸

شکل‌های (۷-۵) تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و شکل‌های (۱۰-۸) تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی را برای شکل‌های مختلف نانوذرات اکسید آلومینیوم در سیال پایهٔ اتیلن گلیکول:آب و در بازه کسر حجمی صفر تا چهار درصد نشان می‌دهند. به‌دلیل کاهش دمای فتوولتاییک در جریان آرام، بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی افزایش پیدا می‌کنند ولی در جریان مغشوش در اثر افزایش دمای فتوولتاییک با افزایش کسر حجمی، بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی کاهش پیدا می‌کنند (شکل‌های ۵ و ۸).

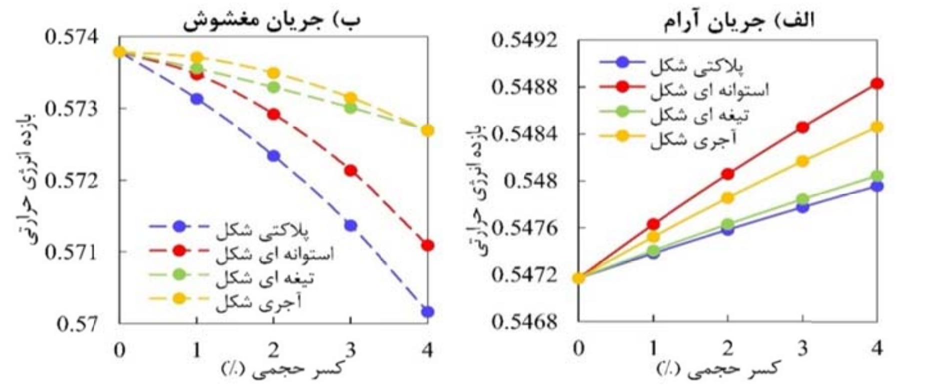
در جریان آرام نانوسیال با نانوذرهٔ استوانه‌ای و در جریان مغشوش نانوسیال با نانوذرات آجری و تیغه‌ای‌شکل بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی بزرگ‌تری درمقایسه با سایر نانوذرات دارند؛ زیرا دمای سطح فتوولتاییک، هنگام استفاده از آنها کمتر از سایر شکل‌ها بوده است.

بازده انرژی حرارتی به ظرفیت حرارتی و دمای خروجی بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (٦) مشخص است، در جریان آرام که افزایش دمای خروجی شدیدتر از جریان مغشوش است، بازده انرژی حرارتی افزایش می‌یابد؛ اما در جریان مغشوش، کاهش ظرفیت حرارتی با افزایش کسر حجمی باعث کاهش بازده انرژی حرارتی می‌شود.

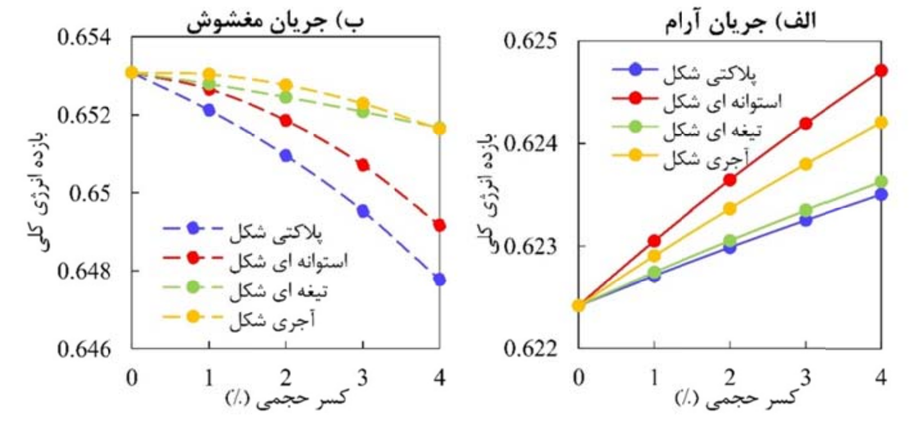
در جریان آرام، نانوسیال حاوی نانوذرهٔ استوانه‌ای و در جریان مغشوش نانوسیال دارای نانوذرات آجری و تیغه‌ای‌شکل به‌دلیل داشتن دمای خروجی بالاتر درمقایسه با سایر شکل‌های نانوذرات، بازده انرژی حرارتی بزرگ‌تری را بروز می‌دهند.



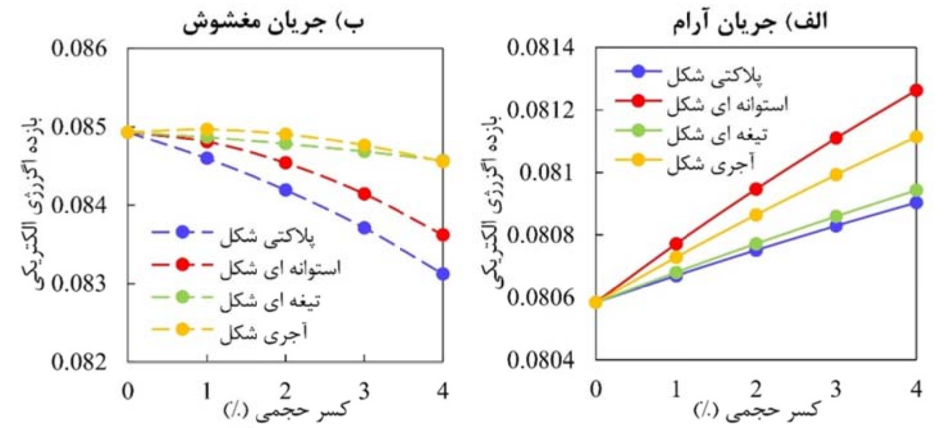
شکل ۵ تغییرات بازده انرژی الکتریکی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش



شکل ٦ تغییرات بازده انرژی حرارتی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش



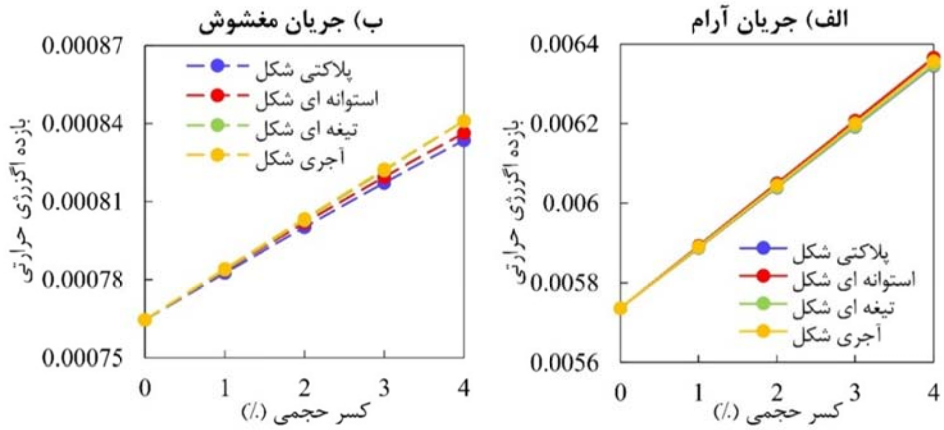
شکل ۷ تغییرات بازده انرژی کلی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش



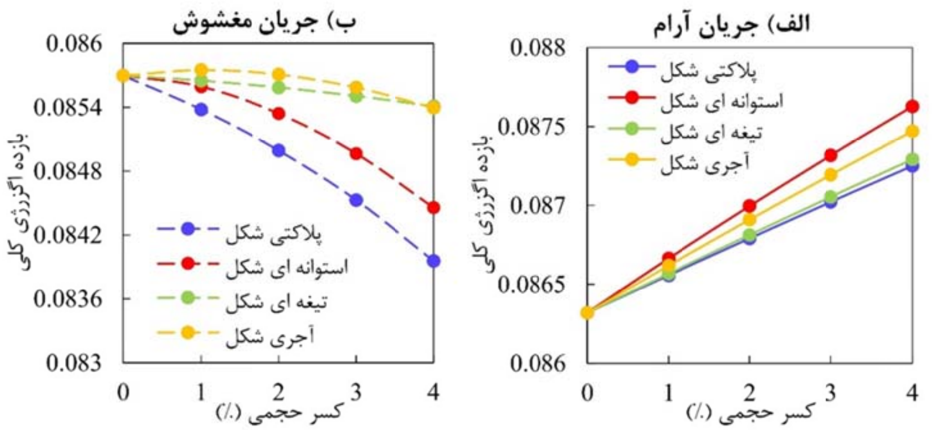
شکل ۸ تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش

بازده اگزرژی حرارتی بیشتر متأثر از دمای خروجی است و با افزایش کسر حجمی در هر دو جریان آرام و مغشوش افزایش می‌یابد (شکل ۹). روند تغییرات بازده اگزرژی حرارتی برای شکل‌های مختلف نانوذره با کسر حجمی، مشابه با روند تغییرات دمای خروجی است.

باتوجه به شکل (۷)، افزایش بازده انرژی الکتریکی و حرارتی در جریان آرام منجر به افزایش بازده انرژی کل بر حسب افزایش کسر حجمی می‌شود، درحالی‌که در جریان مغشوش به‌علت کاهش بازده انرژی الکتریکی و حرارتی، بازده انرژی کل کاهش پیدا می‌کند. نانوذرات استوانه‌ای‌شکل در جریان آرام و نانوذرات آجری‌شکل در جریان مغشوش بالاترین بازده انرژی را دارا می‌باشند. بازده اگزرژی کل در جریان آرام به‌علت افزایش بازده اگزرژی الکتریکی و حرارتی افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). در جریان مغشوش بازده اگزرژی کل برای نانوذرات پلاکتی، استوانه‌ای و تیغه‌ای‌شکل در اثر کاهش بازده اگزرژی الکتریکی کاهش می‌یابند؛ ولی برای نانوذرهٔ آجری‌شکل که بیشترین بازده اگزرژی الکتریکی و حرارتی را در جریان مغشوش دارد، تقابل اثر کاهشی بازده اگزرژی الکتریکی و اثر افزایشی بازده اگزرژی حرارتی باعث افزایش بازده اگزرژی تا کسر حجمی ۱٪ و سپس کاهش آن می‌شود.



شکل ۹ تغییرات بازده اگزرژی حرارتی با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش



شکل ۱۰ تغییرات بازده اگزرژی کل با کسر حجمی و شکل نانوذرات متفاوت برای جریان الف: آرام، ب: مغشوش

جمع‌بندی

در این پژوهش یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکنندهٔ سهموی خطی مدل‌سازی شد. اثر استفاده از نانوسیال اکسیدآلومینیوم/ اتیلن‌گلیکول: آب ۵۰:۵۰ بر دمای فتوولتاییک، دمای سیال خروجی، بازده انرژی و بازده اگزرژی سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین اثر غلظت و شکل نانوذرات با به‌کارگیری نانوذرات پلاکتی، استوانه‌ای، تیغه‌ای و آجری‌شکل در کسرهای حجمی یک تا چهار درصد مطالعه شد. خلاصه نتایج این بررسی به‌شرح زیر است:

- با افزایش کسر حجمی نانوذرات دمای فتوولتاییک در جریان آرام کاهش و در جریان مغشوش افزایش می‌یابد، ولی دمای سیال خروجی در هر دو جریان با افزایش کسر حجمی افزایش پیدا می‌کند.
- کمترین دمای فتوولتاییک در جریان آرام مربوط به نانوذرهٔ استوانه‌ای‌شکل و در جریان مغشوش مربوط به نانوذرهٔ آجری‌شکل است.
- در جریان آرام، شکل نانوذرات اکسید آلومینیوم بر دمای خروجی اثر چندانی ندارد، اما در جریان مغشوش، نانوسیال حاوی نانوذرات تیغه‌ای و آجری دمای خروجی بیشتری را نتیجه می‌دهند.

- بازده انرژی کل در جریان آرام افزایش و در جریان مغشوش کاهش پیدا می‌کند.
- بازده اگزرژی کل در جریان آرام افزایش می‌یابد درحالی‌که در جریان مغشوش بازده اگزرژی کل برای نانوذرات پلاکتی، استوانه‌ای و تیغه‌ای‌شکل کاهش می‌یابد، ولی برای نانوذرهٔ آجری‌شکل شاهد افزایش بازده اگزرژی تا کسر حجمی ۱٪ و سپس کاهش آن هستیم.
- استفاده از نانوذرات استوانه‌ای‌شکل در جریان آرام و نانوذرات آجری‌شکل در جریان مغشوش منجر به حداکثر بازده انرژی و اگزرژی می‌شود.

فهرست علایم

علایم انگلیسی

A	مساحت (m^2)
CR	نسبت تمرکز
D	قطر (m)
f	ضریب اصطکاک
h_c	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
h_r	ضریب انتقال حرارت تابشی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
I_B	شدت تابش ورودی مستقیم (Wm^{-2})
L	طول سیستم (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs^{-1})
Nu	عدد ناسلت
pa	ضریب فشردگی
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
w	عرض (m)

علائم یونانی

α	ضریب جذب
β_r	ضریب دمایی در شرایط مرجع
γ_t	عامل ممانعت
ρ	ضریب انعکاس، چگالی (kgm^{-3})
η	بازده
η_r	بازده سلول خورشیدی در شرایط مرجع
σ	ثابت استفان بولتزمن ($Wm^{-2}K^{-4}$)
τ	ضریب عبور
θ	شیب کلکتور
φ	کسر حجمی

زیرنویس‌ها

a	لایهٔ هوا
abs	جاذب حرارتی
adh	چسب رسانای حرارتی
b	اتصال لوله
bf	سیال پایه
con	متمرکزکننده
i	لایهٔ عایق
nf	نانوسیال
np	نانوذره
PV	صفحهٔ فتوولتاییک
PV/T	فتوولتاییک/ حرارتی
CPV/T	فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکننده
t	لوله
w	سیال عامل انتقال حرارت

مراجع

1. Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Yusaf, T. and Azmi, W., "Solar energy in Iran: Current state and outlook", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 931-942, (2015) .
2. Shafiee, S. and Topal, E., "When will fossil fuel reserves be diminished?", *Energy policy*, Vol. 37, No. 1, pp. 181-189, (2009) .
3. Makki, A., Omer, S. and Sabir, H., "Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, No. 0, pp. 658-684, (2015) .
4. Saharaf, O.Z. and Orhan, M.F., "Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I–Fundamentals, design considerations and current technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 1500-1565, (2015) .
5. Saharaf, O.Z. and Orhan, M.F., "Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II–Implemented systems, performance assessment, and future directions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 1566-1633, (2015) .
6. Coventry, J.S., "Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector", *Solar Energy*, Vol. 78, No. 2, pp. 211-222, (2005) .
7. Li, M., Ji, X., Li, G., Wei, S., Li, Y. and Shi, F., "Performance study of solar cell arrays based on a trough concentrating photovoltaic/thermal system", *Applied Energy*, Vol. 88, No. 9, pp. 3218-3227, (2011) .
8. Li, M., Ji, X., Li, G., Yang, Z., Wei, S. and Wang, L., "Performance investigation and optimization of the Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal system", *Solar Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 1028-1034, (2011) .
9. Ji, X., Li, M., Lin, W., Wang, W., Wang, L. and Luo, X., "Modeling and characteristic parameters analysis of a trough concentrating photovoltaic/thermal system with GaAs and super cell arrays", *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2012, (2012) .
10. Calise, F., Palombo, A., and Vanoli, L., "A finite-volume model of a parabolic trough photovoltaic/thermal collector :Energetic and exergetic analyses", *Energy*, Vol. 46, No. 1, pp. 283-294, (2012) .
11. Chaabane, M. ,Charfi, W., Mhiri, H and Bournot, P., "Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems", *Solar Energy*, Vol. 98, pp. 315-321, (2013) .
12. Del Col, D., Bortolato, M., Padovan, A. and Quaggia, M., "Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT system", *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 255-264, (2014) .
13. Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S.A., Pop, I. and Wongwises, S., "A review of the applications of nanofluids in solar energy", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, No. 2, pp. 582-594, (2013) .
14. Mahian, O., Kianifar, Kleinstreuer, C., Al-Nimr, M.A, A., Kalogirou, Pop, I., Sahin, A.Z. and Wongwises, S., "A review of entropy generation in nanofluid flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 514-532, (2013) .
15. Cui, Y. and Zhu, Q., "Study of Photovoltaic/Thermal Systems with MgO-Water Nanofluids Flowing

over Silicon Solar Cells", *In Proceedings of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Shanghai,China (2012) .
16. Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M. and Heris, S.Z., "Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units)", *Energy*, Vol. 66, pp. 264-272, (2014) .
17. Karami, N. and Rahimi, M., "Heat transfer enhancement in a hybrid microchannel-photovoltaic cell using Boehmite nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 55 ,pp. 45-52, (2014) .
18. Sardarabadi, M. and Passandideh-Fard, M., "Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT)", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 157, pp. 533-542, (2016) .
19. Rejeb, O., Sardarabadi, M., Ménézo, C., Passandideh-Fard, M., Dhaou, M.H. and Jemni, A., "Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, pp. 367-377, (2016) .
20. Xu, Z. and Kleinstreuer, C., "Concentration photovoltaic–thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating", *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 504-512, (2014) .
21. Xu, Z. and Kleinstreuer, C., "Computational analysis of nanofluid cooling of high concentration photovoltaic cells", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 6, No. 3, pp. 031009-031009-9, (2014) .
22. Jing, D., Hu, Y., Liu, M., Wei, J. and Guo, L., "Preparation of highly dispersed nanofluid and CFD study of its utilization in a concentrating PV/T system", *Solar Energy*, Vol. 112, pp. 30-40, (2015) .
23. Radwan, A., Ahmed, M. and Ookawara, S., "Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a microchannel heat sink with nanofluids", *Energy Conversion and Management*, Vol. 119, pp. 289-303, (2016) .
24. Yazdanifard, F., Ebrahimnia-Bajestan, E. and Ameri, M., "Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime", *Renewable Energy*, Vol. 99, pp. 295-306, (2016) .
25. Pak, B.C. and Cho, Y.I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, (1998) .
26. Xuan, Y. and Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, (2000) .
27. Timofeeva, E.V., Routbort, J.L. and Singh, D., "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids", *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, No. 1, pp. 014304, (2009) .
28. Mahian, O., Kianifar, A., Heris, S. Z. and Wongwises, S., "First and second laws analysis of a minichannel-based solar collector using boehmite alumina nanofluids: effects of nanoparticle shape and tube materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 1166-1176, (2014) .
29. Shah, R.K., London, A.L., Irvine, T.F. and Hartnett, J.P., "Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data", *Elsevier Science*, (2014) .

30. Bergman, T.L., Lavine, A.S. and Incropera, F.P., "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition", John Wiley & Sons, New York, (2011).